

配电柜智能监控系统嵌入式设计方法研究

张轩

张家口市夜景照明管理中心, 河北 张家口 075000

摘要: 随着智能电网和工业自动化的发展, 配电系统对实时监控与远程管理的需求不断提升。本文围绕配电柜智能监控系统的嵌入式设计展开研究, 重点分析了系统结构、软硬件设计、数据通信与远程控制等关键环节。通过构建基于嵌入式平台的智能监控原型系统, 实现了对电流、电压、温湿度等关键参数的实时采集与告警响应。试验结果表明, 该系统具有稳定性强、数据采集精度高、适应性广等优点, 具备良好的工程应用前景。

关键词: 配电柜; 嵌入式系统; 智能监控; 远程管理; 数据采集

DOI:10.63887/jeti.2025.1.3.34

引言

配电柜是电力系统中的关键设备, 其运行状态直接关系到用电系统的安全与效率。传统配电柜监控手段存在实时性差、自动化程度低的问题。为提升配电管理智能化水平, 嵌入式技术与智能监控系统的结合成为研究热点。本文结合当前嵌入式系统与物联网技术的发展趋势, 探讨配电柜智能监控系统的设计思路 and 实现路径, 旨在为电力系统的运行维护提供更高效率、智能的技术支持。

1 系统总体设计方案

1.1 设计目标与功能需求分析

为了实现对配电柜运行状态的实时掌握与智能化管理, 系统设计应满足以下核心目标: 一是实现对电气参数的全面监控, 包括三相电流、电压、频率、有功功率、功率因数等数据的精确采集与记录; 二是完成对环境参数的监控, 主要涵盖温度、湿度、烟雾等信息, 以便识别过热、凝露及火灾等风险; 三是具备智能报警机制, 能在出现电力异常、温度超限或设备故障时, 第一时间进行声光报警并通过远程通信模块向运维人员发送预警信息; 四是支持数据存储与远程访问, 保证历史数据可追

溯, 同时支持远程升级与系统维护, 提升运维效率。此外, 为便于系统部署与维护, 整体设计还需兼顾结构紧凑、安装简便与功耗低等特点^[1]。

1.2 系统架构及模块划分

系统采用分层式架构设计, 分为感知层、控制层、通信层和管理层。其中, 感知层主要由电气参数采集单元和环境传感器组成, 负责采集配电柜内部电流、电压、温湿度、烟雾浓度等数据; 控制层以嵌入式主控板为核心, 负责各类传感数据的实时处理、存储与逻辑判断, 并对报警机制和设备状态进行控制; 通信层则包括 RS485 总线、以太网接口、Wi-Fi/4G 模块等, 实现与本地控制平台或远程云平台的数据传输; 管理层可由上位机软件或移动 App 组成, 便于用户远程查看状态、下载数据、设置阈值等操作。系统模块化设计不仅有利于功能扩展, 也便于后期故障定位与维护。每个模块之间通过标准接口连接, 实现硬件协同和软件解耦^[2-3]。

1.3 设计选型与关键技术参数

主控平台是系统核心, 需选用具备多通道 ADC、高速处理能力与丰富外设接口的嵌入式

芯片。综合考虑性能、稳定性和开发资源,选用 STM32F407 系列或 ESP32 为主控平台较为适宜。STM32F407 基于 ARM Cortex-M4 内核,拥有强大的计算能力和丰富的通信接口,适合处理复杂控制与多任务调度。ESP32 则内置 Wi-Fi 与蓝牙模块,适用于具备无线通信需求的轻量化应用。传感器方面,电气参数采集采用霍尔电流传感器与分压电路结合的方式,温湿度采集可使用 DHT22 或 SHT30,烟雾监测则可选用 MQ-2 或 GS-711 等模块。通信接口方面,为满足不同应用场景,系统同时保留 RS485 总线接口用于本地 Modbus RTU 协议通信,以太网或 Wi-Fi 模块用于接入局域网,必要时集成 4G 模块以支持远程通信。整套系统以嵌入式 C 语言开发,搭载 RTOS 实现多任务管理,确保系统稳定性与响应实时性。

2 硬件系统设计

2.1 主控模块设计

主控模块作为配电柜智能监控系统的大脑,承担着采集数据、逻辑判断、控制执行、通信管理等关键任务。选用 STM32F407 系列微控制器,其基于 ARM Cortex-M4 内核,具备高达 168MHz 的主频、1MB Flash 和 192KB SRAM,能够满足多任务并行处理需求。核心电路部分主要包括电源滤波、晶振电路、复位电路和调试接口。为保证系统的时钟稳定性,采用 8MHz 晶振搭配 PLL 倍频至系统运行频率,同时外设晶振提供精准的时间基准。

在外围接口设计方面,充分利用 STM32 的多通道 ADC、UART、SPI、I2C 和 CAN 接口资源。通过多通道 ADC 连接电流、电压等模拟传感器;利用 I2C 总线连接温湿度等数字传感器;通过 UART 与 4G 模块通信,SPI 接口则连接外部 Flash 存储器用于数据备份。调试与升级采用 SWD 调试口,可实现在线调试与固件升级。为提升系统的抗干扰能力,在所有敏感接口上增加 TVS 二极管、RC 滤波网络和隔离器件,提升电磁兼容性(EMC)水平。

同时,微控制器进入空闲模式时自动降低主频和关闭不必要外设,实现低功耗运行,在保障性能的同时有效节能。

2.2 传感器与执行器电路设计

传感器模块主要负责对配电柜内部运行状态与环境数据进行实时感知。电流传感器采用霍尔效应原理器件,如 ACS712 或 LA55-P,通过隔离方式采集三相电流信号,保证采样安全可靠;电压信号通过电阻分压网络结合运放调理后输入至 ADC 通道,确保信号范围符合微控制器采样规范。为提高测量精度,对信号采集电路加入低通滤波器以抑制高频干扰,并通过软件滤波算法进一步提升数据稳定性。

环境参数方面,温湿度传感器选用 SHT30,具备高精度和 I2C 数字输出,便于通信与布线;烟雾传感器使用 MQ-2 模块,可检测空气中可燃气体浓度,输出模拟信号,经由运放放大后送至主控 ADC。为确保传感器长期稳定运行,每个传感器电路均配备电源隔离模块,避免感应干扰互相传导。同时,系统预留继电器控制接口,作为执行器输出,用于联动风扇启动、故障切断等应急响应措施,接口采用光耦隔离控制,提高系统抗干扰能力和安全性^[4-5]。

2.3 电源与保护设计

系统电源部分设计以稳定、安全、冗余为原则,主电源输入为 DC 12V 或 DC 24V,适应工业现场供电标准。核心电路采用 LDO 与 DC-DC 模块组合供电策略,高效率 DC-DC 模块将输入电压降压至 5V,再通过 LDO 稳压提供 3.3V 用于主控与传感器供电。为防止电压波动或反接造成系统损坏,在电源入口设置过压保护电路、反接保护二极管与自恢复保险丝,并使用大容量滤波电容稳定输出。

3 嵌入式软件设计

3.1 嵌入式操作系统选择与任务调度

配电柜智能监控系统需同时执行数据采

集、通信处理、报警响应等多任务操作，为保障系统的实时性与稳定性，选用 FreeRTOS 作为嵌入式操作系统。FreeRTOS 具备轻量化、开源、高可配置等特点，适合运行在 STM32、ESP32 等资源受限的 MCU 平台上。

系统任务划分主要包括数据采集任务、通信任务、报警处理任务、UI 显示任务和系统维护任务。每个任务设定不同的优先级，例如数据采集与报警处理属于高优先级任务，确保快速响应系统状态；通信任务与显示任务设为中等优先级，保证数据稳定传输与人机交互；系统维护则为低优先级，周期性执行诊断与日志记录等后台任务。通过 FreeRTOS 提供的时间片轮转与抢占式调度机制，确保高优任务优先执行，同时避免资源冲突。使用消息队列与信号量机制协调任务间通信，有效降低数据竞争风险并提高系统并发处理能力。

3.2 数据采集与处理逻辑

数据采集模块负责周期性从电流、电压、温湿度、烟雾等传感器中获取模拟或数字信号，并对其进行预处理。采样周期根据被测信号的变化速度设定为 1 秒至 10 秒之间，电气参数以高频率采集（如 1 秒一次），环境参数则可采用较低频率（如 5-10 秒一次）。

为提升数据稳定性，系统集成数字滤波算法对采集结果进行平滑处理。常用方法包括滑动平均法、中位值滤波以及加权平均法等。例如，对电流数据采用 5 点滑动平均法，有效抑制突发噪声干扰。

3.3 通信协议与远程控制实现

通信模块是系统连接外部世界的关键桥梁，需同时支持本地通信与远程联网功能。为适应不同应用场景，系统嵌入多种通信协议，包括 Modbus RTU、TCP/IP 与 MQTT 协议。Modbus RTU 基于 RS485 总线，适用于现场组网，通过查询响应模式由上位机轮询终端状态，具有结构简单、工业兼容性强的优势。

在远程通信方面，系统集成 TCP/IP 协议栈，搭配以太网或 Wi-Fi/4G 模块，实现与云服务器的数据交互。通过 HTTP 或 Socket 实现远程访问，支持配置参数读取、历史数据查询、故障记录上传等功能。同时，为满足物联网架构需求，引入轻量级的 MQTT 协议，支持发布-订阅模式，将关键数据（如电流异常、电压波动等）实时推送至远程平台，提升系统响应速度与远程监控体验。

在通信安全方面，系统支持加密传输（如 TLS/SSL）、设备认证与断线重连机制，防止数据被恶意篡改或丢失。所有通信协议均采用模块化软件封装方式实现，便于后续维护与扩展，如未来可接入 LoRa、NB-IoT 等新型无线通信方式，以增强系统在不同场景下的适应能力与可拓展性。

4 系统测试与性能评估

4.1 功能测试方案与结果

为了全面验证配电柜智能监控系统的各项功能是否达到设计预期，测试内容涵盖了电气参数采集、环境数据监控、报警响应、通信稳定性以及远程控制等多个关键模块。在标准测试条件下（DC 24V 供电、三相配电回路、室温 25℃、湿度 50%），构建了本地 Modbus 通信网络与远程 MQTT 平台，以模拟真实应用环境。

在电流与电压测试中，通过调节负载，系统成功读取三相电参数，并与高精度电力分析仪对比，误差控制在±2%以内，满足精度要求。温湿度与烟雾测试中，传感器响应灵敏，能准确反映环境变化，报警模块在阈值超限时及时触发声光提示并远程告警。通信方面，Modbus RTU 与 Wi-Fi/4G 通道均表现稳定，数据包连续发送无丢失，支持远程参数修改并即时生效。此外，系统在断电重启测试中表现良好，30 秒内完成自动重连与状态恢复。

4.2 性能指标评估

为进一步量化系统性能,从响应时间、数据精度与稳定性三个维度进行评估。响应时间测试以任务处理与报警响应为核心,在高负荷运行状态下,系统平均响应时间为 250ms,报警响应时间小于 500ms,满足实时监控需求。

数据精度方面,采用对比分析法,用标定电力仪表与数字温湿度计作为参考源,系统采集数据与标准值误差范围控制在 2%以内,采样噪声标准差小于 0.05,说明采集系统具有良好的精度与一致性。

系统稳定性测试通过长时间运行验证,在连续运行 72 小时期间,系统无死机、通信中断或数据丢失现象,系统掉电恢复时间约为 10 秒,数据存储完整。内存与任务占用率保持在 70%以下,说明系统资源配置合理,具备较强抗干扰能力与运行冗余空间。

4.3 应用场景测试与改进建议

在实际应用测试中,系统被部署至城市变电站与某工业厂房的配电房进行为期一周的试运行。在变电站应用场景中,系统通过 RS485 总线与原有 SCADA 系统兼容运行,实

现数据同步;面对高电磁干扰环境,主控模块保持稳定运行,未出现干扰引起的误动作,说明 EMC 设计有效。环境监测数据显示温度波动与设备负载变化具有明显关联,系统可辅助优化设备运行调度。

在工厂测试中,系统通过 Wi-Fi 模块与本地工业网关连接,成功接入企业云平台。通过远程 Web 端查看实时数据、修改配置及下载历史数据,体验流畅。现场测试人员对系统的模块化结构与实时告警功能给予正面反馈。然而也发现部分问题:当 Wi-Fi 信号弱时出现短暂通信中断,建议后续集成冗余通信模块(如 4G)增强可靠性;另外在烟雾检测中,对非电气烟尘(如焊接烟雾)也会触发报警,建议优化传感器灵敏度及算法判别逻辑。

结语

配电柜智能监控系统的嵌入式设计有效融合了软硬件技术,提升了配电系统的自动化与远程管理能力。系统通过合理的模块划分与嵌入式操作系统调度,实现了对电气与环境参数的高精度采集与稳定通信。

参考文献

- [1]曾文鑫. 配电室智能监控系统的设计与施工探讨[J]. 居业,2024,(11):103-105.
- [2]梁颖锐. 基于物联网的智能配电系统实时监控系统研究[J]. 中国宽带,2024,20(09):97-99.
- [3]崔梓莹. 人工智能技术在输配电系统监控中的应用[J]. 集成电路应用,2024,41(07):362-363.
- [4]黄奕翔. 变配电系统智能监控与故障诊断技术研究[J]. 电气技术与经济,2024,(05):307-309.
- [5]王耀东. 基于物联网的配电网智能监控系统[J]. 电气技术与经济,2024,(04):177-179.